

## 시뮬레이터를 이용한 가변속 풍력발전기 제어시스템 검증

차 삼곤<sup>1)</sup>, 한 상열<sup>2)</sup>, 차 종환<sup>3)</sup>, 최 원호<sup>4)</sup>, 이 승구<sup>5)</sup>

### Verification of The Variable-Speed Wind Turbine Control System by Using the Simulator

Samgon Cha, Sangyul Gan, Jonghwan Cha, Wonho choi, SeungKuh Lee

**Key words** : Wind turbine simulator(풍력발전기 시뮬레이터), Wind turbine controller(풍력발전기 컨트롤러), Pitch control(피치제어), Torque control(토크제어), Power control (출력제어), Variable-speed wind turbine(가변속 풍력발전기)

**Abstract** : For the development of wind turbine, generally simulator is used. Simulator include wind turbine components. e.g blades, pitch and pitching method, rotor, yaw system, tower, drive train and so on. Few the more, it include a external circumstance. e.g wind speed, wind direction, air density. these basic parameters be used for the control of wind turbine by wind turbine controller in wind turbine simulator.

The wind turbine controller can be designed in the wind turbine simulator. But a developer must make the real control system that will be made using PLC or PC or other processor. The developer must verify the function of control system. that is control algorithm, I/O function, communication, sequence and so on. This verification is possible if we substitute the real wind turbine control system for wind turbine controller in the simulator.

### 1. 서론

풍력발전기는 일반적으로 출력 용량에 따라 소형(10kW 이하), 중형(900kW 이하), 대형(900kW 초과)로 분류할 수 있다. 특히 중대형 풍력 발전기의 경우 제작 및 설치를 위해서는 많은 금액과 시간이 필요하게 된다. 따라서 기구부 및 제어시스템을 포함한 풍력발전기의 설계 단계에서의 실수는 큰 손실을 유발하게 된다.

풍력발전기의 설계를 위해 외부조건 즉, 풍속 풍향, 공기밀도 등을 모사하며, 풍력발전기의 구성 요소인 블레이드, 피치제어 방법, 로터, 요 시스템, 타워, 드라이브 트레인 등을 모사 할 수 있는 풍력발전기 시뮬레이터가 사용된다. 여기에는 설계된 각 구성기기의 기계적, 전기적 특성들이 포함되어 제어기의 설계 및 특성을 모사 할 수도 있다. 시뮬레이터에서 모사된 풍력발전기는 외부 조건 파라미터에 따라 성능 및 각 구성기기의 하중을 시뮬레이션 할 수 있으며, 이를 통해 각 구

성기기의 설계, 수정 및 검증을 수행하게 된다.

이러한 검증 단계를 거쳐 설계된 풍력발전기의 각 구성기기는 제작 단계를 거치게 된다. 제작이 완료된 구성기기는 하중 및 동작 성능을 검증하여 검증이 완료되면 풍력발전기에 설치된다. 하지만 다른 구성기기와는 달리 제어시스템의 경우, 풍력 발전기가 설치되어 실제 운전이 이루어지기 전까지 제어 시스템 제작, 제어기의 프로그램 및 시퀀스의 타당성 검증에는 어려움이 따른다.

현재 개발 중인 (주)효성 2MW 풍력발전기(HS90)의 제어시스템 검증 위해 제어시스템을 제외한 외부 조건 및 구성기기의 데이터는 설계를 위해 사용된 시뮬레이터를 사용하고, 실제로 제작된 제어시스템은 데이터 통신을 통해 시뮬레이터의 제어시스템을 대체하여 동작하는 방법을 사용하였다. 즉, 완전한 시뮬레이터에서 제어시스템만을 실제 제작된 제어시스템으로 대체하여 실제 제작된 제어시스템을 검증하였다. 본 논문의 실험에서는 시뮬레이터로 GH Bladed (Garrad Hassan

and Partners Ltd)를 이용하였으며, 실제 제작된 제어시스템에는 메인 컨트롤러, 피치제어기, GUI, 요드라이브, PCS, I/O Unit을 구성하여 실시하였다.

## 2. 풍력발전기 제어시스템 검증을 위한 구성 기기

풍력발전기를 위해 실제로 제작된 제어시스템 검증을 위해서는 제어시스템을 제외한 외부 환경 및 구성기기 모사를 위해 시뮬레이터를 이용하게 된다. 제작된 제어시스템과 시뮬레이터는 통신을 통해 서로가 필요로 하는 데이터를 주고받으며 둘 간의 역할을 충실히 실행함으로써 마치 실제 설치된 풍력발전기의 동작을 모사하게 된다. 이러한 모사를 통해 제작된 제어시스템의 제어성능, 동작의 타당성, 메인 컨트롤러와 주변 시스템과의 통신성능 및 기능검증, 입출력 신호의 동작상태를 검증할 수 있다.

### 2.1 시스템 구성

#### 2.2.1 구성 기기

1) 시뮬레이터는 컴퓨터에서 실행되며, PLC에서는 풍력발전기의 제어시스템을 제어하며, 두 시스템은 일정 주기를 가지고 데이터 송수신을 한다.

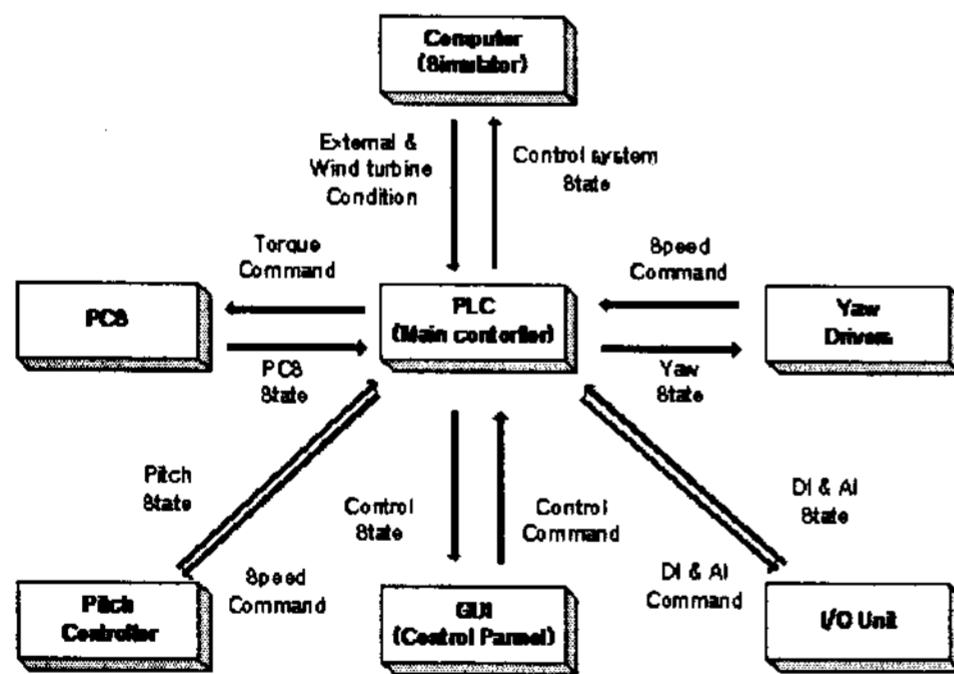


Fig. 1 Simulation signal flow

위의 Fig.1 Simulation signal flow는 시뮬레이터를 통해 제어시스템을 검증하기 위한 구성 기기의 데이터 흐름도이다.

#### 2.2.2 시뮬레이터

본 논문에 사용된 시뮬레이터는 GH Bladed (Garrad Hassan and Partners Ltd)이며, 풍력발전기의 모델은 당사에서 개발 중인 2MW 풍력발전기를 사용하였다. 모델링을 수행하고, 연산된 데이

터를 제어시스템 컨트롤러(PLC)와 송수신하기 위해 별도의 보조 시뮬레이션 툴이 필요하며, 이는 GH TestEnv (Garrad Hassan and Partners Ltd)를 사용하였다.

시뮬레이터에서는 제어시스템을 제외한 외부 환경 및 구성기기의 모델링을 수행한다. 시뮬레이터는 변화되는 풍속 및 풍향을 모사하고 정의된 블레이드를 통해 변환되는 회전력을 연산하게 된다. 연산된 회전력은 모델링 된 풍력발전기의 드라이브 트레인을 통해 발전기의 회전속도를 연산한다. 시뮬레이터에서는 회전속도뿐만 아니라 요에러, 블레이드, 타워, 너셀등 작용되는 하중 및 모멘트 등의 모델링도 함께 수행되며, 실제의 제어시스템이 필요로 하는 데이터를 전달 할 뿐만 아니라, 실제 제어시스템의 성능에 따른 풍력발전기의 성능을 평가 할 수 있다.

#### 2.2.3 제어시스템 컨트롤러(PLC)

시뮬레이터로부터 연산된 발전기의 회전속도 및 요 에러 등의 데이터는 PLC로 전달되며, PLC는 현재 발전기의 상태에 따른 최적의 토크제어와 속도제어를 위해 제어 알고리즘을 수행하게 된다. Fig.1 Simulation signal flow에서 시뮬레이터를 제외한 제어시스템 구성기기는 실제로 제작된 것이며, 따라서 PLC와 각 구성기기간의 제어명령 및 상태 모니터링은 실제로 통신 및 제어입출력을 통해 이루어진다. 피치컨트롤러는 제어명령에 따라 3개의 블레이드에 각각 속도명령을 전달하며, 속도명령에 따른 블레이드의 실제 엔코더 값 및 상태를 PLC에 전달하게 된다. PLC에 전달된 데이터는 다시 시뮬레이터로 전달되어 시뮬레이션을 위한 데이터로 사용된다. 따라서 시뮬레이터를 통해 피치의 속도 및 위치, 이에 따른 로터의 속도를 평가함으로써 실제 속도제어기인 피치제어 알고리즘 및 성능을 평가 할 수 있다. 여기서 피치의 속도 및 위치는 피치제어기의 시뮬레이션 모드를 사용한 것으로 실제 모터가 움직인 것은 아님을 명시한다.

토크제어는 PLC의 토크제어 알고리즘을 통해 연산된 토크명령을 PCS에 전달하게 됨으로써 이루어진다. 또한 토크명령에 따른 PCS의 동작 및 상태 값을 PLC에 전달하고 PLC는 시뮬레이터에도 전달한다. 따라서 토크제어의 경우에도 제어 알고리즘 및 성능평가가 이루어 질 수 있다.

요 드라이버의 경우에도 같은 데이터 흐름을 따라 제어가 이루어진다. 요 제어의 경우 별도의 엔코더를 장치하여 I/O 입력을 통해 실제 요의 움직임을 모니터링 할 수 있도록 설계되었다. 요 제어는 풍향을 추적하는 기능과 너셀의 회전에 따른 전력, 통신 케이블의 꼬임을 방지하는 요소를

포함하였으며, 실제 요 제어에서 필요로 하는 제어 및 기능을 실험할 수 있도록 하였다.

GUI(Graphic User Interface)는 PLC에 입력되는 데이터를 디스플레이 하고, 필요한 경우 사용자에게 의해 수동 조작이 가능하도록 설계되었으며, 각 데이터의 용도에 따라 저장 및 모니터링이 가능하도록 설계되었다. 따라서 이러한 GUI의 기능의 실험이 가능하다.

PLC를 포함하여 여러 가지 통신 및 제어입출력, 각 제어시스템 구성기기의 성능검증은 제어시스템의 실제 설치 후 발생 가능한 오류를 예측, 수정하여 시간 및 안정성을 확보하는 목적으로 사용할 수 있다.

### 3. 실험 및 평가

#### 3.1 PCS와 피치제어기에 의한 풍력 발전기의 속도제어

가변속 풍력 발전기의 경우 속도제어는 크게 두 가지에 단계로 나뉘게 된다.

$$Q_d = K_\lambda w_g^2 \quad (1)$$

$$K_\lambda = \pi \rho R^5 C_P(\lambda) / 2 \lambda^3 G^3$$

$Q_d$  : 토크 지령값

$w_g$  : 발전기 각속도

$\rho$  : 공기 밀도

$R$  : 로터의 반경

$\lambda$  : 설정 선단속도비

$C_P(\lambda)$  : 선단속도비  $\lambda$ 에서 출력계수

$G$  : 기어비

위의 식(1)은 정격풍속 이하에서 토크명령 값을 나타낸다. 즉, 출력계수를 최대로 하는 선단 속도비를 유지함으로써, 블레이드로부터 얻을 수 있는 공력을 최대로 사용하고자 함이 그 목적이다. 따라서 정격풍속 이하의 경우 토크명령을 이용하여 발전기의 부하(토크)를 조절하여 최적의 선단 속도비를 유지하도록 발전기의 속도를 제어하게 된다.

정격 풍속 이상의 경우 PCS는 발전기의 정격 토크를 유지하며, 피치제어기에 의해 블레이드의 받음각을 변화시킴으로써 블레이드로부터 입력되는 공력을 변화시켜 발전기의 속도를 정격속도로 유지하도록 제어한다. 즉, 정격풍속 이하에서는 PCS의 토크제어에 의해, 정격풍속 이상에서는 피치제어기의 피치제어에 의해 발전기의 속도가 제어된다.

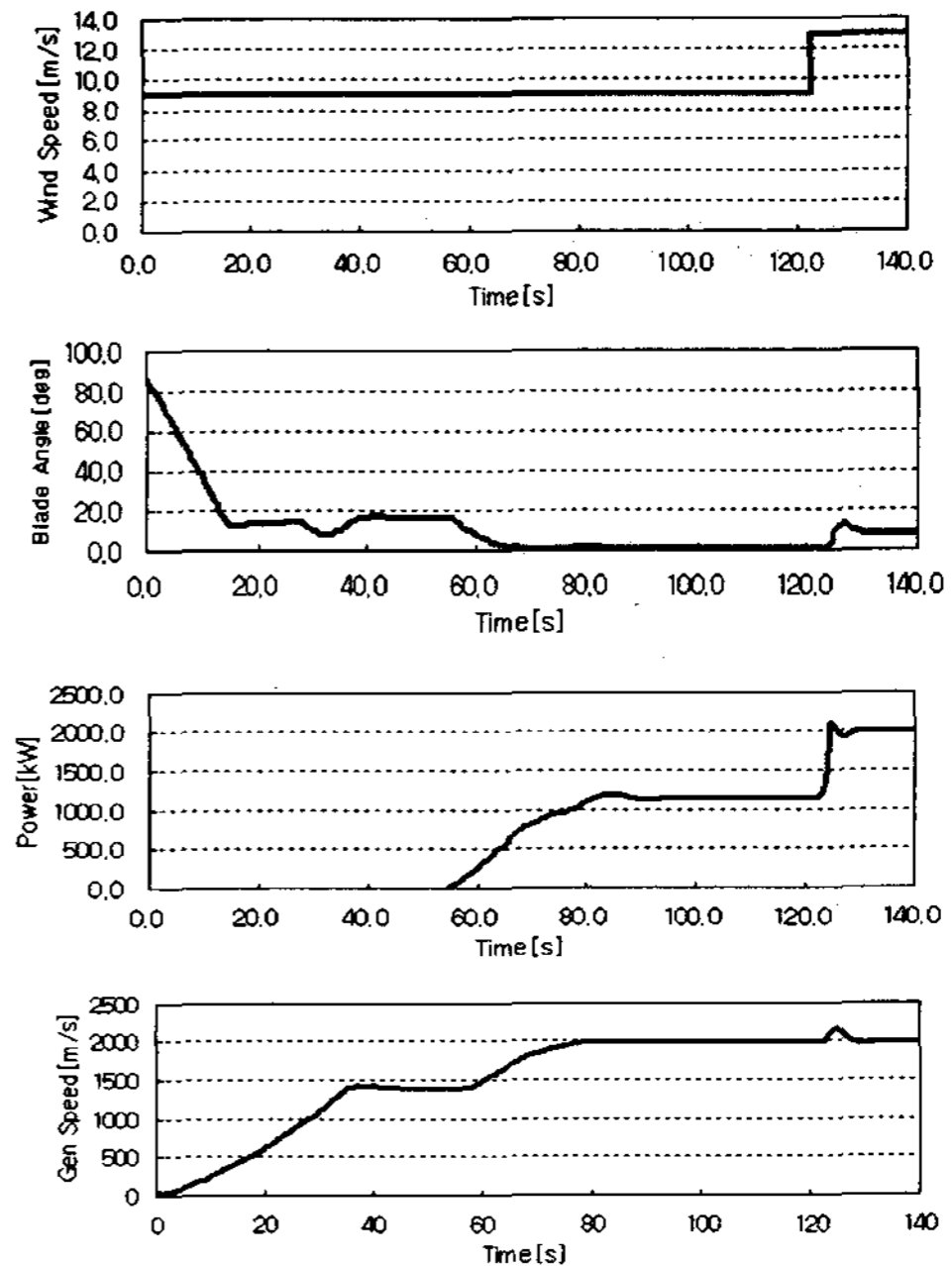


Fig. 2 Low to high wind speed step response (Wind speed 9 to 13 m/s)

위의 Fig.2 는 저풍속(정격풍속 12m/s 이하)에서 발전기가 기동하여 기동이 완료된 후 고풍속으로(정격풍속 12m/s 초과) 풍속이 변하는 경우 시스템의 스텝응답을 시험한 결과이다. 약 90초가 될 때까지는 풍력 발전기가 기동을 시작하는 과정이다. 이때는 안정적인 기동을 위해 피치에 의한 속도제어와 PCS가 정상적인 토크를 발생하기 위한 과정이 진행된다. PCS가 정상적인 출력을 시작하면, PCS의 토크제어에 의해 발전기의 속도가 제어되는 과정이 진행된다. 즉, 저풍속 영역에서는 공력을 최대로 받아들이기 위해 피치제어기는 최소 피치각을 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. HS90의 경우 최소 피치 각은 1.1도 이다. 고풍속이 입력 될 때, PCS에 의한 토크제어가 진행되며 정격토크 이상이 되면, 더 이상 PCS에 의한 발전기의 속도제어는 이루어 질 수 없다. 따라서 약 125초 부근에서 정격출력이 발생하며, 이때 피치각이 변화하여 발전기 속도가 제어되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 위의 시험 데이터를 통해 메인 컨트롤러의 PCS를 통한 토크제어와 피치제어기를 통한 피치제어 알고리즘의 타당성을 확인할 수 있다.

### 3.2 피치제어기의 안정성

저풍속 영역에서는 블레이드를 통해 얻을 수 있는 공력이 정격 이하이기 때문에 PCS를 통한 토크제어의 목적은 공력효율을 극대화하여 출력효율을 향상시키는 것이다. 하지만 고풍속 영역에서는 공력이 정격이상이기 때문에 시스템을 안정적으로 유지하며, 정격출력을 얻는 것을 목적으로 한다. 따라서 이때의 피치제어의 목적은 시스템이 안정적으로 정격출력을 확보하는 것이라고 볼 수 있다.

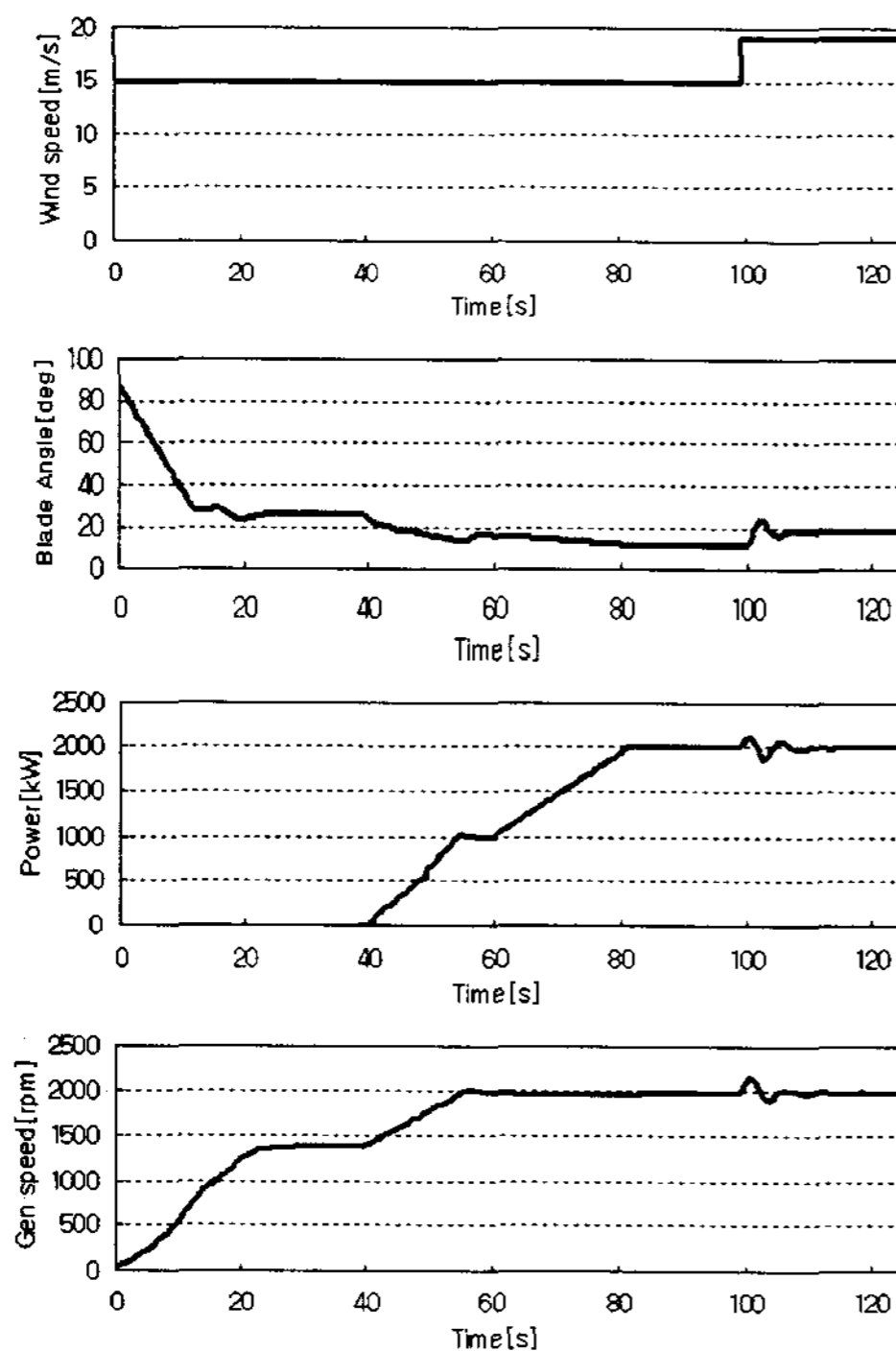


Fig. 2 High to high wind speed step response (Wind speed 15 to 19 m/s)

위의 Fig.2 는 고풍속인 15m/s의 풍속에서 기동하여 19m/s로 변화 할 때 스텝응답을 실험한 결과이다. 여기서는 풍속이 15m/s에서 약 80초 부근 기동이 완료된 후 정격출력이 생산되고 있음을 볼 수 있다. 이때는 이미 발전기의 토크가 정격 토크에 있으며, 공력이 정격이상의 파워를 가지고 있기 때문에 피치에 의해 발전기의 속도제어가 이루어지고 있다. 피치 각은 약 13도 부근 이다. 이후 약 100초 부근에서 19m/s의 풍속이 입력되는 경우 발전기의 속도응답 특성이 과도상태를 지나 안정화 되는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 고풍속의 상태에서 피치제어기의 안정성이 확보되어 풍력발전기의 안정성을 검증 할 수 있다.

### 4. 결론

풍력 발전시스템의 제어시스템은 실제로 제작된 후 제어시스템만으로 그 성능을 검증하기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이터와 연동하여 제어시스템을 검증 할 수 있음을 확인 하였다.

제어시스템은 메인 컨트롤러, 피치제어기, GUI, 요 드라이브, PCS, I/O Unit을 구성하여 제작 하였다.

시뮬레이터는 GH Bladed 와 GH TestEnv (Garrad Hassan and Partners Ltd)를 사용하였다.

저풍속에서 기동하여 고풍속이 입력되는 경우 시스템 응답특성을 실험하여, 메인 컨트롤러의 PCS를 통한 토크제어와 피치제어기를 통한 피치 제어 알고리즘의 타당성 및 통신, 입출력 데이터 검증을 수행하였다.

고풍속에서의 피치제어기에 의한 시스템 안정성 실험을 위해 15m/s에서 19m/s의 풍속 입력에 대한 시스템 응답특성을 검증하여, 피치제어기의 안정성을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 (주)효성의 2MW 대형 풍력발전기의 개발 과정의 일환으로 수행되었으며, 2007년 중 에 강원도 대기리에 설치되어 실증과정을 거칠 예정이다.

### References

- [1] Bossanyi, E.A. 1997, "BLADED for Windows Theory Manual," Bristol, England: Garrad Hassan and Partners Limited.
- [2] Kendall, L., Balas, M.J., Lee, Y.J., Fingersh, L.J., 1997, "Application of Proportional - Integral and Disturbance Accommodating Control to Variable-speed Variable Pitch Horizontal Axis Wind Turbines," Wind Engineering (12:1); pp, 21-38.
- [3] Hand, M., 1998, "Variable-Speed Wind Turbine Controller Systematic Design Methodology: A Comparison of Non-Linear and Linear Model-Based Designs," Master's Degree Thesis, University of Colorado, Boulder, Colorado, U.S.A.